

ESTABILIDAD DEL TRÁFICO EN VIADUCTOS DE CARRETERA Y FERROCARRIL

Javier OLIVA QUECEDO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Escuela de Caminos (UPM)
Investigador contratado
joliva@mecanica.upm.es

José María GOICOLEA RUIGÓMEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Escuela de Caminos (UPM)
Catedrático
jose.goicolea@upm.es

Pablo ANTOLÍN SÁNCHEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Escuela de Caminos (UPM)
Investigador contratado
pablo.antolin@upm.es

Miguel Ángel ASTIZ SUÁREZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Escuela de Caminos (UPM)
Catedrático
miguel.a.astiz@upm.es

RESUMEN

Cuando un automóvil o un tren circula sobre un viaducto se producen efectos dinámicos que, además de aumentar los esfuerzos que ha de soportar el puente, afectan a los propios vehículos. Los fenómenos de vibración lateral en los viaductos de ferrocarril están contemplados de manera muy sucinta en la normativa y pueden afectar a la seguridad y comodidad del tráfico. En el caso de las carreteras, esa dinámica también puede contribuir al riesgo de accidente y al aumento de la sensación de incomodidad, sobre todo si se considera la presencia de vientos laterales. La preocupación por estos fenómenos queda reflejada en el número de artículos publicados en revistas científicas en los últimos años. Para este trabajo se han desarrollado modelos de interacción dinámica que representan el comportamiento de las estructuras, mediante el método de los elementos finitos, y el de los vehículos, mediante sistemas multicuerpo.

PALABRAS CLAVE: Interacción vehículo-estructura, Ferrocarril, Carretera, Viento turbulento, Comodidad de los viajeros, Seguridad del tráfico, Dinámica estructural, Sistemas multicuerpo, Contacto rueda-carril, Dinámica lateral.

1. Introducción

1.1. Carretera

Los vehículos de carretera están expuestos a riesgos en localizaciones donde las características topográficas incrementan los efectos del viento, como por ejemplo terraplenes y viaductos. Cuando un automóvil cruza un puente, se producen efectos dinámicos en vehículo y estructura que no solo hacen crecer los esfuerzos en la estructura, sino que afectan a la seguridad y la comodidad del tráfico a la que ésta da soporte. A todo eso hay que añadir que el propio viaducto se desplaza por efecto del viento induciendo movimientos en los vehículos. Así pues, el tráfico de carretera sobre viaductos puede verse comprometido cuando sopla el viento. Con objeto de reducir los accidentes es habitual tomar medidas de seguridad como fijar un límite para la velocidad de circulación sobre el viaducto o cerrar el puente durante el periodo de viento fuerte. Pero estas medidas están basadas en intuición o experiencia subjetiva. De esta manera, el límite de velocidad impuesto al vehículo o la velocidad de viento que obliga a cerrar la estructura podrían

ser demasiado elevados como para garantizar la seguridad o demasiado bajos como para ser eficientes.

La comprensión de la influencia que los diferentes componentes tienen en este complejo problema dinámico ayudará en la toma de medidas para hacer el tráfico sobre los puentes más fiable sin afectar la integridad estructural del viaducto.

1.2. Ferrocarril

En las dos últimas décadas se ha hecho una gran inversión en España en líneas de ferrocarril de alta velocidad, siendo hoy el país líder europeo en cuanto a número de kilómetros con 2000. Debido a la orografía de la Península Ibérica, en bastantes ocasiones estas líneas tienen que cruzar profundos valles siendo necesario construir gran número de túneles y viaductos. Generalmente estos viaductos se apoyan en pilas o arcos de gran altura, que pueden llegar a superar 100 m, y están formados por tableros continuos con longitudes que a veces superan los 1000 m. Por ello, estas estructuras tienen frecuencias de vibración muy bajas asociadas a modos propios laterales.

En algunos casos, puentes con bajas frecuencias laterales han desarrollado vibraciones considerables comprometiendo la seguridad de la circulación de los vehículos. Este fue el objeto del estudio llevado a cabo por el comité ERRI D181 [12], en cuyo trabajo se incluyeron algunos puentes europeos. Estos puentes estaban constituidos, en su mayor parte, por estructuras metálicas con tablero de sección abierta y rigideces de flexión lateral bajas. De las conclusiones extraídas en este trabajo se incluyeron limitaciones, en cuanto a la deformabilidad lateral de las estructuras y las frecuencias mínimas transversales, en los Eurocódigos [13] y la IAPF 2007 [14]. En principio, la tipología de los puentes considerados en el informe del ERRI no es la misma que la de los que se tratan en este trabajo. Siendo la flexibilidad lateral grande en ambos casos, los viaductos altos y largos, típicos de las líneas de alta velocidad, tienen longitudes de onda, correspondientes a la deformación y a los modos de vibración, más largas, del orden de varios centenares de metros, mientras que los puentes considerados por el ERRI tienen longitudes de onda de deformación lateral del orden de decenas de metros. Es esperable que con estas longitudes de onda más cortas puedan aparecer efectos resonantes o amplificaciones dinámicas del movimiento lateral de los vehículos, cuyas longitudes de onda cinemáticas son de ese orden de magnitud. Por otra parte, para una longitud de onda que sería generalmente mayor que la longitud del tren completo, sería más improbable obtener una amplificación sincrónica en todos los vehículos.

2. Tráfico de carretera

2.1. Modelos

El vehículo propuesto por Coleman y Baker [1], que ha sido empleado por otros autores [2,3], se emplea en este trabajo. Este modelo trata de representar vehículos altos ligeros, como autobuses o camiones descargados, que son muy sensibles al viento transversal. El modelo está formado por un cuerpo rígido que representa la caja del vehículo y cuatro masas concentradas que representan las ruedas. Esas cuatro masas se conectan con la caja por medio de muelles y amortiguadores que representan las propiedades dinámicas de las suspensiones. Otro grupo de muelles y amortiguadores conectan las masas de las ruedas con el pavimento y recogen las características de los neumáticos. El cuerpo del vehículo tiene 5 grados de libertad:

desplazamiento vertical, desplazamiento lateral, balanceo, guiñada y cabeceo. Cada rueda tiene desplazamiento vertical y cada eje desplazamiento lateral de forma que las ruedas de cada eje tienen el mismo desplazamiento lateral. Así pues, el modelo tiene un total de 11 grados de libertad y recoge no solo el comportamiento vertical, sino también el lateral, que es vital para el análisis bajo vientos transversales turbulentos. La figura 1 muestra una imagen del modelo.

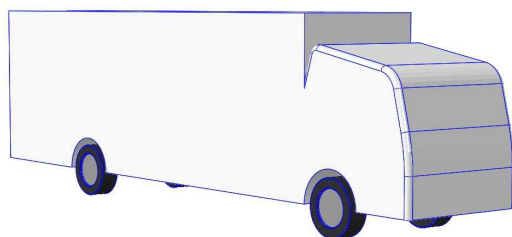


Figura 1. Modelo de vehículo alto sensible al viento.

En lo relativo a las estructuras, en este trabajo se emplea un viaducto mixto. Su sección transversal es un cajón cerrado de 25 metros de anchura. La longitud total es de 220 metros distribuidos en cinco vanos de 40, 45, 50, 45 y 40 metros. La carretera que pasa por él tiene dos carriles por dirección y el vehículo circula por el carril exterior. Para la modelización del viaducto mediante el método de los elementos finitos se emplean vigas tridimensionales con deformación por cortante y amortiguamiento de Rayleigh.

El problema conjunto se resuelve mediante el Método de los Elementos Finitos en un sistema totalmente acoplado. La interacción dinámica se recoge a través del método de penalización lineal entre los nodos inferiores del vehículo y la superficie del puente. El contacto entre cada rueda y el viaducto es un contacto puntual en el que no hay deslizamiento. Las ruedas pueden separarse del puente, pero ese caso es un caso considerado crítico para la seguridad del vehículo. Las ecuaciones de la dinámica se resuelven mediante integración directa en el tiempo empleando el método HHT [4]. Esta metodología ha sido verificada en un escenario patrón [5], los resultados están en muy buena consonancia, pero no se reproducen aquí por brevedad.

2.2. Viento turbulento

La historia de la velocidad del viento turbulento en un punto del espacio se puede representar a través de un proceso estocástico ergódico estacionario descrito a través de su densidad espectral de potencia. La historia se genera como una suma de armónicos. Así se pueden generar las historias de las componentes turbulentas en las tres direcciones del espacio. Cuando en un punto necesito varias de esas componentes, la relación entre ellas se desprecia, sobre todo a cierta distancia del suelo, como es el caso de los tableros de puentes. Se necesita por tanto una definición espectral que caracterice el viento turbulento para cada componente, el espectro de Kaimal [6] se adopta comúnmente y es el empleado en el Eurocódigo [7].

Cuando se quiere generar la historia de viento en varios puntos del espacio hay que considerar que esas historias serán diferentes, pero no independientes. Esa dependencia está relacionada con la distancia entre puntos de forma que cuanto más cerca están, mayor es la coherencia. También se relaciona con la frecuencia, la coherencia es mayor para las frecuencias bajas que se relacionan con remolinos grandes. El tablero se supone horizontal y a distancia constante del suelo de forma que la velocidad media del viento es constante en su longitud. Se asume la

hipótesis de homogeneidad horizontal de forma que las propiedades estadísticas del campo de velocidades de viento son iguales en todo el tablero.

Veers [8] presenta una metodología para computar campos de velocidades de viento a partir de una PSD y una función de coherencia que se denominó SANDIA por los laboratorios donde fue desarrollado. Esa metodología es empleada en este trabajo.

La velocidad media del viento se supone perpendicular al eje del viaducto o sea, perpendicular a la carretera, así que la componente horizontal del viento está alineada con la velocidad del vehículo. Al moverse el vehículo con cierta velocidad, el aire incide sobre él con una velocidad relativa y un ángulo de ataque que dependen de esa velocidad de circulación V . Así pues, necesitaremos unos coeficientes aerodinámicos del vehículo que sean función de ese ángulo de ataque. Snæbjörnsson [9] emplea un conjunto de coeficientes que están en buena consonancia con otros valores encontrados en la literatura medidos en túnel de viento y a escala real [10]. Esos son los coeficientes adoptados para este trabajo.

La velocidad media del viento U es perpendicular al eje del tablero, pero al considerar la turbulencia el ángulo de ataque dejará de ser nulo. Necesitamos por tanto unos coeficientes aerodinámicos en función de ese ángulo de ataque que llamamos α [11].

2.3. Resultados

El primer objetivo es calcular unas Curvas Críticas de Viento (CCV) que nos definan las velocidades a las que puede circular el vehículo según la velocidad media del viento. Para ello se calculan historias de viento en tramos de un kilómetro de longitud. La intensidad de turbulencia I_u se fija en un 14 %. Las velocidades medias de viento empleadas son 5, 10, 15, 17, 20, 22, 25 y 30 m/s. La velocidad del vehículo 10, 30, 50, 70, 90 y 110 km/h.

Para definir el riesgo de accidente se emplean dos criterios de estabilidad, al vuelco y al deslizamiento lateral. A partir de ellos podemos definir unas curvas CCV que definen los pares U - V seguros en el caso de que el vehículo circule por una carretera rígida. La figura 2 muestra las CCV para los casos extremos de adherencia, $\mu=0.9$ para asfalto seco y $\mu=0.5$ para asfalto mojado.

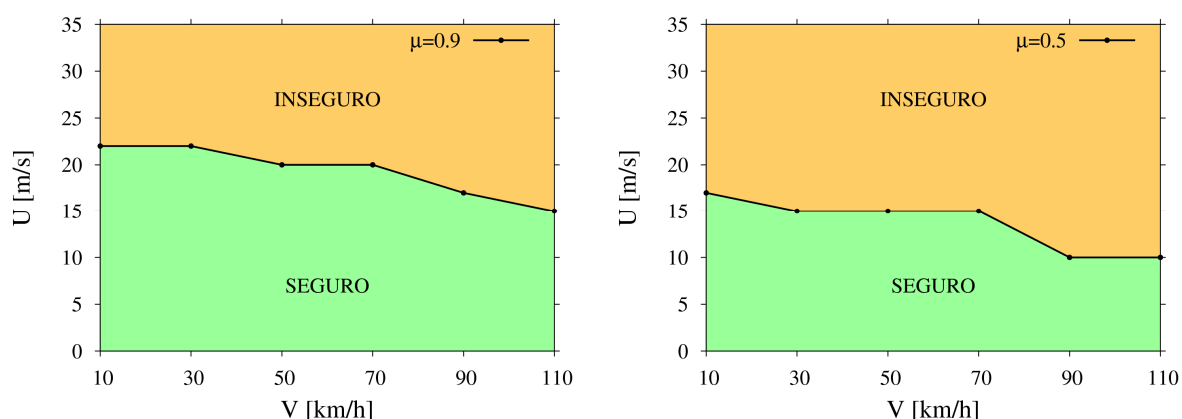


Figura 2. Curvas Críticas de Viento (CCV) para los casos límite del coeficiente de adherencia: Izqda - Asfalto seco ($\mu = 0.9$); Drcha - Asfalto mojado ($\mu = 0.5$).

La figura 3 muestra la desviación típica de la aceleración vertical y lateral en el vehículo para los pares seguros. La lateral es mayor, como era previsible.

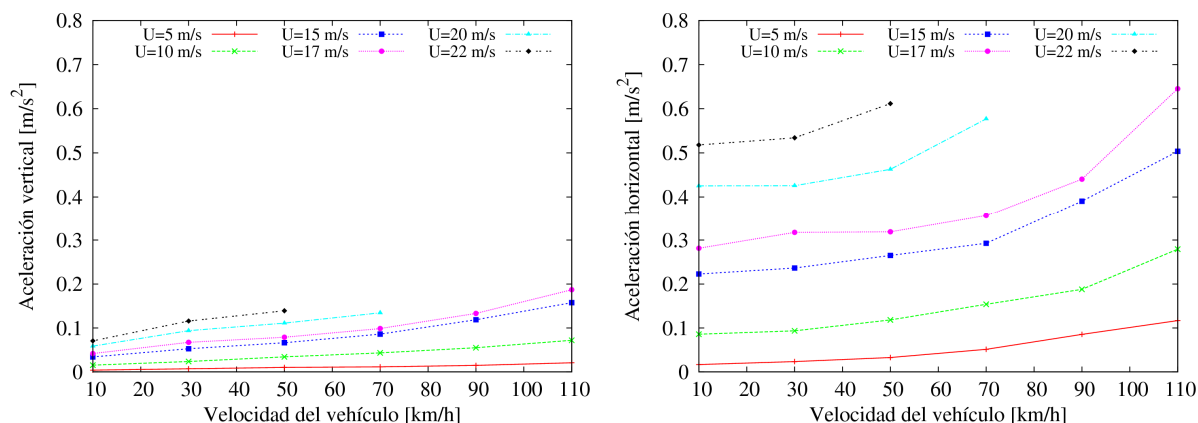


Figura 3. Desviación típica de la aceleración en la caja del vehículo: Izqda – Aceleración vertical; Drcha – Aceleración horizontal.

Si fijamos una velocidad media del viento de 20 m/s, la velocidad del vehículo queda limitada a 70 km/h. En el caso de analizar el viaducto aislado sometido a esa velocidad de viento los mayores efectos tienen lugar en dirección vertical hasta el punto de ser despreciables los efectos laterales (ese resultado va en consonancia con los resultados encontrados en la literatura y con ensayos como los realizados para el puente de Waterford de CFC S. L.). Además, en las CCV hemos obtenido que la velocidad máxima está en torno a 22 m/s, que es una velocidad baja, por lo cual se desprecian las fuerzas auto-excitadas en la estructura.

Con objeto de determinar el efecto de la presencia del puente se aplica la misma historia de velocidad de viento al vehículo circulando por una carretera fija y rígida y al sistema vehículo-puente. La figura 4 (izquierda) compara la aceleración vertical en la caja del vehículo cuando circula a 50 km/h bajo un viento de velocidad media de 20 m/s en el suelo y en el puente. La aceleración vertical se ve incrementada por la presencia del puente. La figura 4 (derecha) también muestra la carga vertical bajo la rueda trasera de barlovento, que es la más propensa a levantarse, esta carga varía muy poco por la presencia de la estructura. Podemos concluir entonces que la presencia del viaducto afecta más a la comodidad que a la seguridad.

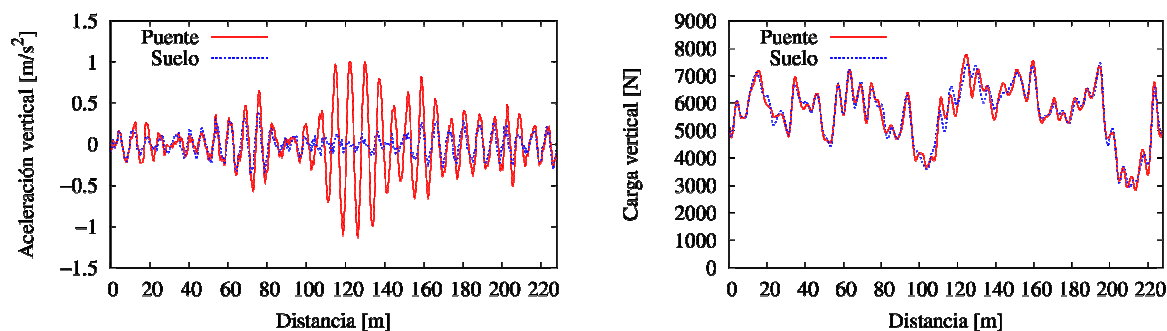


Figura 4. Izqda – Aceleración vertical en la caja del vehículo en suelo y puente con U = 20 m/s y V = 50 km/h. Drcha – Carga vertical bajo la rueda trasera de barlovento en suelo y puente con U = 20 m/s y V = 70 km/h.

En la figura 5 se muestra la desviación típica de la aceleración, valor que define la comodidad, para U = 20 m/s y V = 10, 30, 50 y 70 km/h. El valor del incremento es importante.

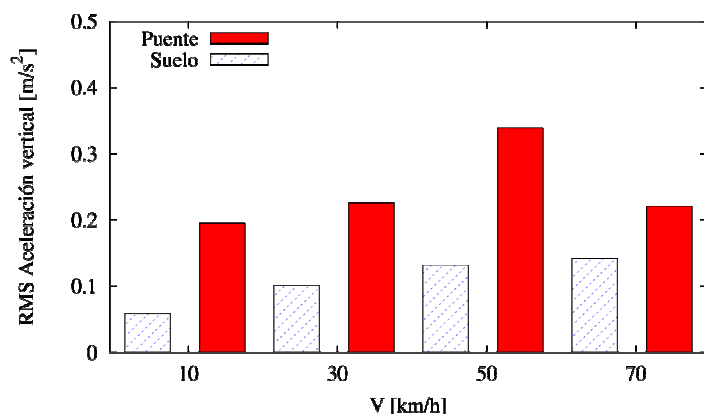


Figura 5. Desviación típica de la aceleración vertical con $U = 20$ m/s en suelo y puente a diferentes velocidades de circulación seguras.

2.4. Conclusiones

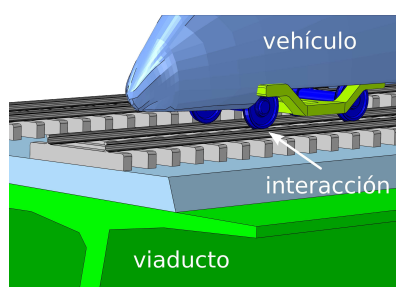
Se han calculado las curvas críticas de viento (CCV) para el vehículo en el suelo rígido, se concluye que con velocidades de viento mayores que 22 m/s la seguridad de ese automóvil está comprometida. Hay que recordar que se ha fijado una intensidad de turbulencia longitudinal del 14 %. Esas curvas son más restrictivas con el pavimento mojado ya que es mayor el riesgo de deslizamiento, la velocidad de viento crítica es aproximadamente 5 m/s menor. La rueda trasera de barlovento es la más propensa a iniciar el vuelco, el deslizamiento también es más probable en el eje trasero; esto se debe a que es el eje menos cargado.

Los efectos laterales en el puente son despreciables, pero el movimiento vertical induce grandes aceleraciones verticales en la caja del vehículo afectando a la comodidad de los viajeros. En las cargas bajo rueda el efecto es menor, así que también parece serlo en la seguridad del tráfico.

Las aceleraciones verticales se ven muy incrementadas por la presencia del viaducto bajo la acción del mismo viento, en algunos casos el valor de la desviación típica de la aceleración pasa a ser más del doble. Se puede concluir que la presencia del viaducto puede afectar seriamente al confort del tráfico pudiendo convertir los viaductos en puntos críticos de comodidad, y potencialmente de seguridad, en las autopistas y autovías.

3. Tráfico ferroviario

Para el estudio de las incertidumbres existentes en el comportamiento lateral acoplado de vehículos y estructuras, que no ha sido estudiado en profundidad, se ha desarrollado un modelo que permite hacerlo de forma realista. Los modelos acoplados para el estudio de la interacción



dinámica lateral de vehículos ferroviarios y viaductos son más complicados que los necesarios para el estudio de las acciones verticales debido a la naturaleza del contacto entre ruedas y carriles, que admite movimientos laterales relativos entre ellos.

Los modelos de interacción vehículo-estructura puede dividirse en cinco partes fundamentales, como señala Zhang [16]: modelo dinámico para el subsistema del vehículo; modelo para el subsistema de la estructura; descripción geométrica de la vía, incluyendo sus irregularidades; contacto rueda-carril; y el algoritmo para la solución numérica del sistema de ecuaciones.

A continuación, se presentan los detalles de los modelos numéricos propuestos y se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología.

3.1. Modelización de la estructura

La estructura se discretiza usando elementos finitos de tipo viga, como en los trabajos de Tanabe [17], Zhang [16] y Nguyen [18], a los que se les ha añadido unas superficies de contacto sobre las que circulará el vehículo (figura 7). Aunque no se incluyen en este trabajo, debido a la generalidad de la metodología, efectos no lineales de material o la geometría, pueden ser tenidos en cuenta.

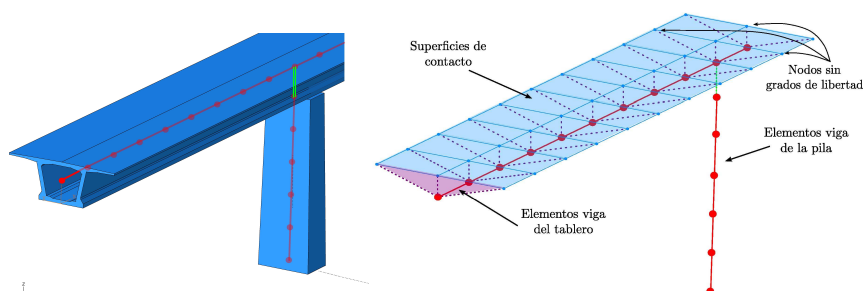


Figura 7. Modelización de la estructura mediante elementos finitos y láminas para establecer la interacción con el vehículo.

3.2. Modelización del vehículo

Los modelos de vehículos ferroviarios están formados por modelos multicuerpo que comprenden sólidos rígidos con conexiones y/o restricciones, y muelles y amortiguadores discretos (figura 8). En los modelos dinámicos de interacción de vehículo-estructura modelos lineales son generalmente empleados para los vehículos, tal como se puede ver en los trabajos de Tanabe [17], Zhang [16], Xia[19] y Nguyen [18]. Al igual que para las estructuras, se suponen pequeños desplazamientos, y se considera lineal el comportamiento de los elementos de suspensión, aunque, al igual que antes, estas hipótesis pueden eliminarse.

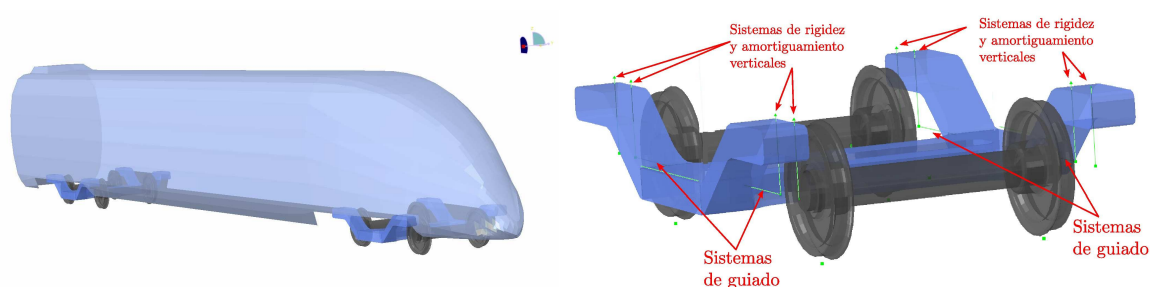
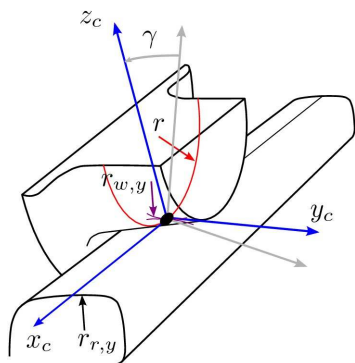


Figura 8. Los vehículos son modelizados mediante sistemas multicuerpo compuestos por sólidos rígidos, las restricciones que se imponen entre ellos y los elementos de suspensión.

3.3. Interacción vehículo-estructura

El punto clave en la interacción dinámica lateral entre vehículos y estructuras es establecer las relaciones dinámicas y geométricas entre ambos subsistemas. Para ellos se consideran teorías de contacto rueda-carril. Para considerar los efectos dinámicos que aparecen en el contacto rueda-carril los desplazamientos relativos entre el eje y la vía deben ser considerados, teniendo en cuenta las restricciones geométricas y las leyes de contacto dinámicas. El primer ingrediente a considerar es la geometría de los perfiles de ruedas y carriles. Una vez que la posición del punto de contacto es determinado, es necesario introducir las fuerzas normales y tangenciales. Para las fuerzas normales, el modelo no lineal de contacto de Hertz, aplicado en el trabajo de Tanabe [17],



es posiblemente la mejor opción. Con frecuencia se aplica una linealización de esta teoría, tal como se detalla en el trabajo de Nguyen [18].

La solución completa del contacto tangencial, incluyendo límites de deslizamiento en cada punto de la superficie de contacto, requiere un gran esfuerzo computacional. Por ello, en este trabajo se ha utilizado una simplificación de esta la teoría llamada FASTSIM,

propuesta por Kalker [20].

Además, debe tenerse en cuenta que la vía no tiene una geometría ideal perfecta. Existen irregularidades en su alineación que son una fuente muy importante de excitación para los vehículos. Los perfiles de irregularidades de la vía pueden ser generados utilizando funciones de densidad espectral de potencia, tal como se define en Claus [21], aunque también, igual que se hace en otros trabajos, pueden utilizarse perfiles de irregularidades medidos en la propia vía.

El último ingrediente necesario para el modelo de interacción es la estrategia a utilizar para obtener la solución en cada paso de tiempo, que al igual que para el tráfico de carretera, consiste en el método HHT [4] de integración implícita para el sistema de ecuaciones diferenciales acoplado de los dos subsistemas.

3.4. Aplicación al viaducto sobre el Arroyo de las Piedras

El modelo propuesto anteriormente ha sido aplicado a un caso representativo de los puentes discutidos, el viaducto sobre el Arroyo de las Piedras, en la línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga, descrito en Millanes [15]. Este es un viaducto de doble vía, con una sección mixta compuesta y que se apoya en pilas de hormigón. Su longitud total es de 1209 m, repartida en vanos de 65 m, y la pila más alta tiene una altura de 94 m, lo que hace que su primer modo de vibración lateral tenga una frecuencia muy baja, como se puede ver en la figura 9.

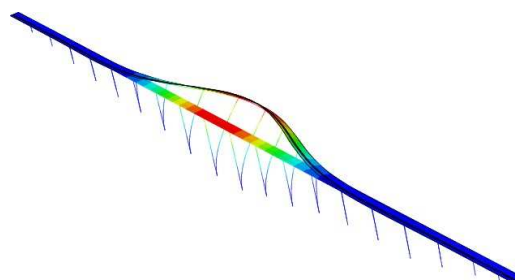


Figura 9. Viaducto sobre el Arroyo de las Piedras, en la línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga (cortesía de IDEAM). Primer modo de vibración 0.313 Hz.

El tren utilizado en los cálculos es una aproximación al Siemens ICE3 (serie S103 de RENFE), compuesto por 8 coches, de 24,775 m cada uno.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el caso en el que el tren circula a 300 km/h en dos situaciones: con y sin irregularidades. Así, en la figura 10 pueden verse los desplazamientos laterales y los giros de torsión del tablero correspondientes al vano 11, contiguo a la pila más alta. Como puede verse en esta figura, la influencia de las irregularidades en la respuesta de la estructura es despreciable. Respecto a la respuesta de los vehículos, en la figura 11 se muestran las aceleraciones laterales de la caja de unos vehículos, así como las fuerzas

laterales que aparecen en el contacto de una de las ruedas. Como puede verse, las irregularidades de la vía tienen una gran influencia en la respuesta del vehículo.

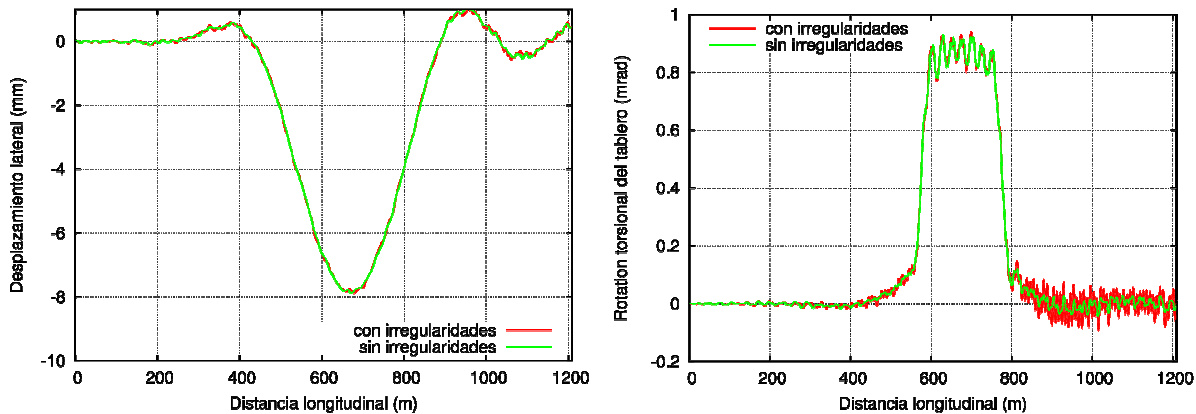


Figura 10. Desplazamientos laterales y giros de torsión del vano 11 del viaducto para los casos con y sin irregularidades.

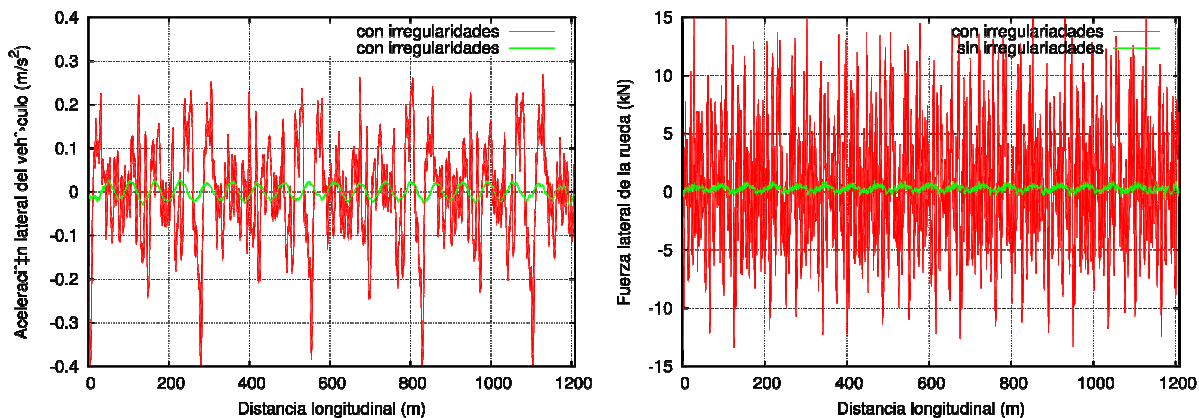


Figura 11. Aceleraciones laterales de la caja de uno de los coches y fuerzas laterales en una de las ruedas para los casos con y sin irregularidades.

3.5. Conclusiones

Las siguientes conclusiones se extraen del trabajo presentado para el tráfico ferroviario:

- Los efectos dinámicos laterales de los viaductos de ferrocarril son un tema importante que debe ser estudiado para garantizar la seguridad del tráfico. Para su estudio, en este trabajo se presenta un modelo que considera la interacción completa entre el vehículo y la estructura de una forma realista, representando las estructuras mediante elementos finitos, los vehículos mediante sistemas multicuerpo y estableciendo una interacción entre ambos basada en las fuerzas de contacto entre rueda y carril.
- Se ha estudiado el caso del viaducto del Arroyo de las Piedras, considerando sólo acciones debidas al tráfico de los vehículos y a las irregularidades de la vía. Los niveles de aceleraciones obtenidos para el vehículo son aceptables, pero en este análisis no se han tenido en cuenta fuentes de excitaciones laterales como son el sismo o el viento.
- El procedimiento propuesto en este trabajo puede ser aplicado para evaluar de forma realista la seguridad del tráfico en situaciones de fuertes vientos transversales o sismos.

- [1] Coleman S. A. y Baker C. J., "High sided road vehicles in cross winds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 36, pp. 1383–1392, 1990.
- [2] Cai C. S. y Chen S. R., "Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis", *Journal of*

Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 92, pp. 579–607, 2004.

- [3] Guo W. H. y Xu Y. L., “Safety analysis of moving road vehicles on a long bridge under crosswind”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132 (4), pp. 438–446, 2006.
- [4] Hilber H. M., Hughes T. J. R., y Taylor R. L. T., “Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 5, pp. 283–292, 1977.
- [5] Marchesiello S., Fasana A., Garibaldi L., y Piombo B. A. D., “Dynamics of multi-span continuous straight bridges subject to multi-degrees of freedom moving vehicle excitation”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 224, pp. 541–561, 1999.
- [6] Kaimal J. C., Wyngaard J. C., Izumi Y., y Coté O. R., “Spectral characteristics of surface-layer turbulence”, *Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 98, pp. 563–589, 1972.
- [7] EN1991-1-4, “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions. Wind actions,” European Committee for standardization (CEN), 2005.
- [8] Veers P. S., “Three-dimensional wind simulation”, Tech. Rep. UC-261, Sandia National Laboratories, 1988.
- [9] Snæbjörnsson J. T., Baker C. J., y Sigbjörnsson R., “Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environments”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, pp. 1445–1462, 2007.
- [10] Sterling M., Quinn A., Hargreaves D., Cheli F., Sabbioni E., Tomasini G., Delaunay D., Baker C., y Morvan H., “A comparison of different methods to evaluate the wind induced forces on high sided lorry”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, pp. 10-20, 2010.
- [11] Strømmen E. N., *Theory of Bridge Aerodynamics*, Springer, Berlin, Germany, 1st edition, 2006.
- [12] ERRI, *Forces Latérales sur les Ponts Ferroviaires. Rapport final RP6*, European Railway Research Institute, 1996.
- [13] European Committee for Standardization, *EN1990-A1: EUROCODE 0 – Basis of Structural Design, Amendment A1: Annex A2, Application for bridges*, European Union, 2005.
- [14] Ministerio de Fomento, *IAPF-07: Instrucción sobre las Acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Ferrocarril*, Gobierno de España, 2007.
- [15] Millanes F., Pascual J., and Ortega M., “‘Arroyo de las Piedras’ viaduct: The first Composite Steel-Concrete High Speed Railway Bridge in Spain”, *Structural Engineering International*, Vol. 17, No. 4, 2007, pp. 292-297.–
- [16] Zhang N., Xia H. and Guo W., “Vehicle-Bridge Interaction Analysis under High-Speed Trains”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 209, No. 3-5, 2008, pp. 405-425.
- [17] Tanabe M., Wakui H., Matsumoto N., Okuda H., Sogabe M. and Komiya S., “Computational model of a Shinkansen Train Running on the Railway”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, 2003 pp. 705-710.
- [18] Nguyen D.V., Kim K.D. and Warnitchai P., “Simulation procedure for Vehicle-Substructure Dynamic Interactions and Wheel Movements using Linearized Wheel-Rail Interfaces”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 45, No. 5, 2009, pp. 341-356.
- [19] Xia H. and Zhang N., *Dynamic Interaction of Vehicles and Structures*, Science Press, Beijing, China, 2ª edición, 2005.
- [20] Kalker, J.J., “A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 11, No. 1, 1982, pp. 1-13.
- [21] Claus H. and Schiehlen W., “Modeling and Simulation of Railway Structural Vibrations”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 29, No. 1, 1997, pp. 538-552.